

BETONIRAKENTEIDEN KELPOISUUS

HEIKKI POIJÄRVI

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 5
No 3 1972 ss. 346-363; Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

0 JOHDANTO

Kantavien rakenteiden ominaisuudet ratkaisevat yleensä koko rakennelman kelpoisuuden. Hyvin huomattava osa kantavista rakenteista valmistetaan nykyään teräsbetonista, joten on erittäin tärkeätä tuntea teräsbetonirakenteiden ominaisuudet.

Nykyään täyttää rakenteisiin käytettävä betoni yleensä sille asetetun potentiaalisena ¹⁾ lujusvaatimuksen ja teräs sille asetetut lujus- ja muodonmuutosvaatimukset. Tämä johtuu siitä, että rakenteiden betonin potentiaalista lujuutta valvotaan tietyllä betoninormissa määrättyllä tavalla ja että betoniterästen ominaisuudet hallitaan melko hyvin terästeollisuuden oman laadunvalvontatoiminnan avulla. Tosiasia on kuitenkin, ettei betonin ja teräksen potentiaalisten ominaisuuksien tuntemus vielä suinkaan takaa teräsbetonirakenteiden kelpoisuutta.

Teräsbetonirakenteiden kelpoisuus on erittäin monitahoinen

1) Betonin potentiaalisella lujuudella tarkoitetaan sitä lujuutta, jonka betoni hyvin tiivistettynä ja jälkihoidettuna voi saavuttaa.

asia. Siihen vaikuttavat betonin ja teräksen ominaisuuksien lisäksi varsin voimakkaasti mitoituksessa käytetyt olettamukset ja ennen kaikkea rakenteiden valmistukseen liittyvät seikat. Idealisoidut materiaali- ja ympäristöominaisuudet saattavat tietyissä tapauksissa johtaa täysin virheellisesti mitoitettuihin rakenteisiin ja toisaalta valmistusteknilliset seikat saattavat mitätöidä huolellisesti suoritettun mitoituksen merkityksen. Tämä johtuu toisaalta siitä, että mitoitettaessa teräsbetonirakenteita käsitellään betonia yleisesti kimmoisana homogeenisena aineena ja toisaalta siitä, ettei nykyisin ole olemassa mitään pakollista menetelmää, jonka avulla määritettäisiin rakenteiden betonin ominaisuudet.

Teräsbetonirakenteiden valmistus voi aiheuttaa sen, että betonin todelliset ominaisuudet poikkeavat voimakkaasti betonin potentiaalisista ominaisuuksista ja toisaalta terästen asettelu saattaa ratkaisevasti poiketa piirustuksen mukaisesta asettelusta ilman, että kenelläkään on tästä mitään tietoa. Nykyisin ei ole mitään yleisesti käytettyä yhtenäistä raudoitusten asennus- eikä tarkastusmenettelyä, joka takaisi aina samanlaisen ja oikean teräsbetonirakenteiden terästen sijainnin.

Betonin lujuuspotentiaalin määrittäminen 28 vrk:n normikoeekapaleiden avulla on betonin kelpoisuuden kannalta tärkeä toimenpide. Tämä ei kuitenkaan yksinään riitä. On välttämätöntä, että kehitetään uusia menetelmiä, joiden avulla teräsbetonirakenteiden kelpoisuus hallittaisiin paremmin kuin tällä hetkellä.

Tässä kirjoituksessa keskitytään tarkastelemaan pääasiallisesti valmistustekniikan vaikutuksia teräsbetonirakenteiden kelpoisuuteen. Aineosien ja mitoituksen sinänsä erittäin merkittävä osuus jätetään tässä yhteydessä muutaman maininnan varaan.

1 TERÄSBETONIRAKENTEIDEN KELPOISUUSOMINAISUUDET

Eri tapauksissa teräsbetonirakenteelta vaaditaan hyvinkin erilaisia kelpoisuusominaisuuksia. Voidaan esittää seuraava jaottelu:

Lujuusominaisuudet

Muodonmuutosominaisuudet

Tiiviysominaisuudet

Pysyvyys-kestävyysominaisuudet

- pakkasenkestävyys
- kemiallisten vaikutusten kestävyys
- kestävyys korkeissa lämpötiloissa

Mittatarkkuus

Ulkonäköominaisuudet

- pinnan laatu
- pinnan väri

Kaikki edellä luetellut kelpoisuusominaisuudet ovat sellaisia, että ne olosuhteista ja rakenteesta riippuen voivat muodostua hyvin tärkeiksi.

Nykyisin tarkoitetaan useimmiten teräsbetonirakenteen suunnittelulla sen mitoitusta tiettyjen lujuusominaisuuksien perusteella. On kuitenkin ilmeistä, että kaikki edellä esitetyt teräsbetonirakenteiden kelpoisuusominaisuudet on tilanteesta riippuen otettava huomioon rakenteita suunniteltaessa ts. ne ovat kaikki tärkeitä teräsbetonirakenteiden suunnittelun perusteita.

2 TERÄSBETONIRAKENTEIDEN KELPOISUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Teräsbetonirakenteiden kelpoisuusominaisuuksiin vaikuttavat voimakkaasti käytetyn betonin ja teräksen laatu sekä rakenteen mitoi-

tus ja valmistustekniset seikat. Koska teräsbetonin toinen aineosa betoni on sinänsä aineosista valmistettava tuote, vaikuttavat betonin aineosien laatu ja keskinäiset suhteet sekä betonin valmistus myös aivan olennaisesti teräsbetonirakenteiden kelpoisuuteen. Teräsbetonirakenteiden kelpoisuuteen vaikuttavat päätekijät ovat seuraavat:

Aineosat:

- betoni
 - runkoaine, sementti, vesi, lisäaineet, seossuhteet
- teräs

Mitoitus:

- oletetut kuormitukset
- oletetut materiaaliominaisuudet
 - betonin kimmokerroin, betonin hiipuma ja kutistuma, betonin lämmönkehitys
- ympäristöolosuhteet
 - lämpötilanmuutokset, perustusten liikkeet, korroosiota aiheuttavat tekijät

Valmistustekniikka:

- muottimateriaali ja muotin rakenne
- raudoituksen laatu ja sijainti
- betonimassan valmistus ja kuljetus
- betonointi
 - betonimassan sijoittaminen muotteihin, betonimassan tiivistäminen
- lämpökäsittely
- jälkihoito

On selvää, että betonin tai teräksen laadun ollessa virheellinen, ei teräsbetonirakenteesta saada kunnollista. Toisaalta voidaan

valmistaa sekä kelvollisia että kelvottomia teräsbetonirakenteita käytettäessä oikealaatuista betonia ja terästä. Näissä tapauksissa tulevat kysymykseen juuri edellä mainitut mitoitus- ja valmistustekniset seikat.

3 VALMISTUSTEKNISTEN TEKIJÖITTEN VAIKUTUS

3.1 Yleistä

Seuraavassa pyritään lyhyesti tarkastelemaan valmistusteknis-ten tekijöitten vaikutuksia teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin. Kun tarkastellaan tiettyä valmistusteknistä tekijää, oletetaan, että muut tekijät eivät vaikuta rakennetta parantavasti tai huonontavasti.

3.2 Muottimateriaali ja muotin rakenne

Muottimateriaali ja muotin rakenne vaikuttavat varsinkin teräsbetonirakenteiden ulkonäköominaisuuksiin ja mittatarkkuuteen.

Ulkonäköominaisuudet kohdistuvat tässä tapauksessa pääasiallisesti betonin pintaan, johon eri muottimateriaalit aiheuttavat erilaiset väri vaihtelut ja erilaiset pintahuokosten muodostuksen kolot ja nystermit.

Mittapoikkeamat vaikuttavat tietenkin rakenteiden ulkonäköön, mutta ne saattavat myös aiheuttaa suuria muutoksia teräsbetonirakenteiden oletettuun rakenteelliseen toimintaan. Tämä koskee kaikkia teräsbetonirakenteita, mutta erityisesti elementtirakenteita ja niiden liitoksia.

3.3 Raudoituksen laatu ja sijainti

Raudoituksen virheellinen laatu ja sijainti saattavat vaikuttaa varsin voimakkaasti seuraaviin teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin:

Lujuusominaisuudet

- väärä sijainti, virheelliset jatkokset ja ankkurointi, virheelliset taivutukset, väärä suunnittelu (betonointi)

Muodonmuutosominaisuudet

- väärä sijainti, väärä suunnittelu (betonointi)

Tiivistysominaisuudet

- väärä sijainti, väärä suunnittelu (betonointi)

Pysyvyys- ja kestävyysominaisuudet

- liian lähellä pintaa, väärä suunnittelu (betonointi)

Ulkonäköominaisuudet

- liian lähellä pintaa, väärä suunnittelu (betonointi)

Erityisesti on syytä tähdentää raudoituksen suunnittelun merkitystä teräsbetonirakenteiden betonoinnin kannalta. Mikäli raudoitukset suunnitellaan ajattelematta ollenkaan betonoinnin suoritusta, betonointi muodostuu usein erittäin vaikeaksi niissä kohdin, joissa raudoitusta on hyvin paljon. Raudoitus toimii tällöin seulan tavoin aiheuttaen betonin erottumista. Pahimmassa tapauksessa saattaa muodostua kohtia, joissa on lähes pelkkää sementtilaastia ja kohtia, joissa on lähes pelkkiä kiviä. On muistettava, että paikoissa, joissa raudoitusta on runsaasti, rasitukset ovat myös suurimmat. Rakenne voi siis betonoinnin kannalta väärin suunnitellun raudoituksen takia muodostua pahiten rasitetuissa kohdissaan varsin epähomogeeniseksi ja kelpoisuudeltaan kyseenalaiseksi. Jotta raudoitusten laatu ja sijainti mahdollisimman yleisesti olisivat moitteettomat, tulisi tut-

kimuksin luoda yhdenmukaiset periaatteet ja menetelmät raudoituksen suunnittelua, valmistusta ja asennusta varten.

3.4 Betonimassan valmistus ja kuljetus

Mikäli aineosat ovat betonin valmistuksen kannalta kelvolliset, betonin valmistuksen onnistuminen riippuu betoniaseman laitteista. Tällöin tulevat kysymykseen nimenomaan annostuslaitteet ja sekoittimet.

Annostelemalla betonin aineosat väärin tai käyttämällä tarkoitukseen soveltumatonta sekoitinta betonin laatu saattaa olla aivan muuta kuin on oletettu. Samoin käy tästä betonista tehtyjen teräsbetonirakenteiden kelpoisuusominaisuuksien.

Kuljetettaessa betonimassaa saattaa massa erottua ja massan lisähuokostus vähentyä. Erottumisella tarkoitetaan tässä sitä, että betonimassan kivisyys vaihtelee. Betonoitaessa erottuneella massalla tulee rakenteesta epähomogeeninen. Pahimmassa tapauksessa saattaa rakenteeseen syntyä "rotanpesiä". Teräsbetonirakenteen seuraavat kelpoisuusominaisuudet saattavat tällöin olennaisesti huonontua: tiivistysominaisuudet, pysyvyys- ja kestävyysominaisuudet ja ulkonäköominaisuudet.

Betonimassan lisähuokostuksen väheneminen huonontaa massasta valmistetun rakenteen pakkasenkestävyyttä. Betonimassan kuljettamisella saattaa siten olla varsin merkittävä vaikutus teräsbetonirakenteiden pysyvyys- ja kestävyysominaisuuksiin.

3.5 Betonointi

Betonoitaessa betonimassa sijoitetaan muotteihin ja tiivistetään.

Kun betonimassa sijoitetaan muotteihin, se voi työn suunnittelusta ja suorituksesta riippuen erottua varsinkin jos rakenteet ovat korkeita, muodoiltaan ahtaita ja monimutkaisia tai tiheästi raudoitettuja (edellä). Mikäli erottumista tapahtuu, se vaikuttaa huonontavasti moniin teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin. Olennaisimmat vaikutukset kohdistuvat tiiviysominaisuuksiin, pysyvyys- ja kestävyysominaisuuksiin sekä ulkonäköominaisuuksiin.

Betonimassan tiivistäminen muottiin on eräs keskeisimmistä teräsbetonirakenteen kelpoisuuteen vaikuttavista tekijöistä. Tiivistämisen merkitys on sitä suurempi mitä ahtaampi muotti, tiheämpi rauditus ja jäykempi massa ovat kysymyksessä. Tiivistäminen vaikuttaa kaikkiin teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin mutta erityisesti lujuusominaisuuksiin ja tiiviysominaisuuksiin.

Viereisessä taulukossa on esitetty suuntaa antavasti täysin tiivistämättömän betonin lujuuden (σ_h) suhde täysin tiivistetyn betonin lujuuteen (σ_t) betonimassan notkeuden funktiona.

notkeus	σ_h/σ_t
vetelä-notkea	0,95...0,90
plastinen-jäykkä	0,80...0,70
erittäin jäykkä-maakostea	0,65...0,40

On varmaa, että tiivistämällä betoni eri tavoilla saadaan kelpoisuudeltaan hyvinkin erilaisia rakenteita. Kussakin tapauksessa tulisi erikseen selvittää, onko käytettävä tiivistysmenetelmä sopiva ja riittävän tehokas.

3.6 Lämpökäsittely

Teräsbetonielementit lämpökäsitellään varsin yleisesti. Riippuen käytetyn betonin koostumuksesta ja lämpökäsittelymenetelmästä jää lopullinen lujuus yleensä 10...30 % pienemmäksi kuin vastaavan lämpökäsittelemättömän betonin lujuus. Tämä on otettava huomioon, kun suunnitellaan lämpökäsiteltävien elementtien betonin koostumusta. Lämpökäsittelyssä syntyy rakenteisiin yleensä myös lämpöjännityksiä, jotka saattavat aiheuttaa rakenteen halkeilua. Lisäksi voi rakenteen pintaan muodostua hilseilyä ja runsaasti pintahuokosia. Lämpökäsittely voi siten vaikuttaa seuraaviin teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin: lujuusominaisuuksiin, tiiviysominaisuuksiin ja ulkonäköominaisuuksiin.

3.7 Jälkihoito

Betonimassasta tulee kovettunutta betonia sementin ja veden välisen kemiallisen reaktion seurauksena. Jotta reaktio voisi tapahtua kunnolla, betonin on oltava riittävän kauan riittävän lämpimässä ja kosteassa ympäristössä. Betoni tarvitsee siis yleensä jälkihoitoa, jonka laatu vaikuttaa teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin.

Betonirakentamisen teollistuessa on muodostunut valmistusmenetelmiä, joissa lähes samanlaiset rakenteet jälkihoidetaan aivan eri tavoilla. Tyypillisiä tällaisia menetelmiä ovat valmistus elementtitehtaassa, valmistus suurmuottityömaalla ja valmistus perinteellisin paikallavalumenetelmin. Kiire, tilanahtaus ja talvisaikainen pakkanen saattavat yhdessä aiheuttaa sen, että jälkihoito sekä elementtitehtaalla että suurmuottityömaalla jää kokonaan suorittamatta. Teräsbetonirakenteiden betoni omaa tällaisissa tapauksissa

vain ne ominaisuudet, mitä niihin on muodostunut lämpökäsittelyn avulla. Jälkihoidon vaihtelut aiheuttavat varmasti muutoksia seuraavissa rakenteiden betonin ominaisuuksissa: lujuus, tiiviys, hiipuminen sekä kosteustila ja kutistuminen. Nämä ominaisuudet vaikuttavat edelleen kaikkiin teräsbetonirakenteen kelpoisuusominaisuuksiin (koh- ta 1).

Esimerkiksi murtolujuuden kannalta tilanne saattaa tietyissä tapauksissa muodostua kriittiseksi, koska yksinomaan lämpökäsittelyn avulla saavutettu rakenteiden betonin lujuus voi olla jopa vain 20... 30 % lujuuslaskelmien pohjaksi oletetusta lujuudesta.

Teollisiin valmistusmenetelmiin verrattuna jälkihoito suori- tetaan yleensä paremmin valmistettaessa rakenteita perinteellisin paikallavalumenetelmin. Edellytyksenä tälle on tietenkin, että tal- visaikaan noudatetaan talvibetonoinnin vakiintuneita menetelmiä.

4 BETONITEKNIIKAN TEOLLISTUMINEN JA TERÄSBETONIRAKENTEIDEN KELPOISUUS

Betonitekniikan teollistumisella on ollut erittäin merkittävä vaikutus moniin rakennustekniikan keskeisiin kysymyksiin. Teollistu- minen on kuitenkin ollut niin nopeata, että kokonaistilanne erityi- sestä rakenteiden kelpoisuuden kannalta on vielä suhteellisen sekava.

Teräsbetonirakenteiden valmistuksen siirtyessä perinteisestä paikallavalmistustekniikasta nopeasti kehittyvään elementti- ja suur- muottitekniikkaan on saavutettu monia ratkaisevia etuja, mutta on kohdattu myös monia sellaisia ongelmia, joita ei vielä ole kunnolla ratkaistu.

Käytettäessä jatkuvasti jotain teollista valmistusmenetelmää on aina mahdollista kehittää menetelmä sellaiseksi, että tuotetut te-

teräsbetonirakenteet ovat kelpoisuudeltaan korkeata luokkaa. Tämä on kiistämättä eräs erittäin merkityksellinen betonitekniikan teollistumisen etu. On kuitenkin heti sanottava, että teollisesti valmistettujen teräsbetonirakenteiden todellista kelpoisuutta ei nykyään yleensä tunneta, olipa menetelmä rationalisoitu miten tehokkaasti tahansa. Tämä johtuu siitä, ettei yleensä ole määritelty minkäänlaiseen kelpoisuuteen on tarkoitus päästä eikä myöskään ole mitään yleismenetelmiä, joilla rakenteiden kelpoisuusominaisuuksia voitaisiin valvoa ja kelpoisuus määrittää. Teräsbetonirakenteiden kelpoisuuden arvioimisen tekevät vaikeaksi puutteelliset tiedot varsinkin seuraavista seikoista: raudoituksen asema, betonin tiivistämisaste / tiivistyksen vaikutus, lämpökäsittelyn vaikutus ja jälkihoidon laatu. Ellei edellä mainittuja seikkoja tunneta riittävän hyvin, ei myöskään tunneta riittävän hyvin teräsbetonirakenteiden kelpoisuusominaisuuksia, ts. yleensä ei tunneta riittävän hyvin teräsbetonirakenteilta kulloinkin vaa-dittavaa kelpoisuutta.

Verrattuna perinteiseen paikallavalutekniikkaan ovat edellä esitetyistä tekijöistä tiivistäminen, lämpökäsittely ja jälkihoito vaikutukseltaan merkittävämpiä valmistettaessa rakenteita teollisesti. Tämä johtuu seuraavista syistä:

- tiivistämisen merkitys teollisten menetelmien yhteydessä on usein huomattavasti suurempi kuin paikallavalutekniikassa, koska edellisissä yleensä pyritään jäykempiin massoihin kuin jälkimmäisissä
- lämpökäsittelyä käytetään paljon yleisemmin elementtitekniikassa kuin paikallavalutekniikassa
- teollistunut betonitekniikkamme on miltei tyystin "unohtanut" betonin jälkihoidon, jonka betoni paikallavalutekniikan yhteydessä miltei automaattisesti saa.

5 TERÄSBETONIRAKENTEIDEN KELPOISUUDEN TOTEAMINEN

5.1 Nykyinen tilanne

Rakennustarkastaja toteaa teräsbetonirakenteiden kelpoisuuden käytettävissä olevien tietojen ja silmämääräisen tarkastuksen perusteella [1]. Käytettävissä olevat tiedot ovat yleensä seuraavat [1]:

- aineosien laatua koskevat todistukset
- betonin laadunvalvonta-aineisto
- betonin kelpoisuuskokeiden tulokset valmiiksi laskettuine vertailulujuuksineen
- terästen laatutodistukset sekä mahdollisten työmaalta otettujen näytteiden koetustulokset: hitsattujen jatkosten koetustulokset
- rakentamiseen käytettyjen betonisten valmisosien laatua osoittavat todistukset ja koetustulokset.

Aineosien laatua koskevat todistukset tarkoittavat tavallisesti käytetyn kiviaineksen rakaisuutta ja puhtautta sekä käytetyn lisäaineen käyttöselostusta.

Betonin laadunvalvonta-aineisto on tavallisesti varsin epämääräinen, koska laadunvalvontatoimenpiteet ovat yleensä vapaaehtoisia. Valmisbetonitehtaiden käyttämän betonin puristuslujuuden pikakoetuksen avulla kertyvä laadunvalvonta-aineisto on kuitenkin hyvä esimerkiksi selväpiirteisestä vapaaehtoisesta laadunvalvonnasta.

Betonin kelpoisuuskokeiden tulokset tarkoittavat käytetystä betonista valmistetuin normikoe-kappalein määritettyjä 28 vrk:n puris-

potentiaallinen lujuus on aina oleva tärkeä lähtökohta rakenteiden kelpoisuutta tarkasteltaessa. Vielä voidaan mainita, että kokeellisesti on todettu normikoe-kappalein määritettyjen lujuustulosten yleensä kuvaavan varsin hyvin perinteisin paikallavalumenetelmin valmistettujen betonirakenteiden betonin lujuutta [4].

5.2 Tulevaisuuden kaavailua

5.2.1 Yleistä

Edellä esitetyn mukaan on tällä hetkellä täysin perusteltua sanoa, ettei teräsbetonirakenteiden todellista kelpoisuutta yleensä tunneta. On kuitenkin saman tien todettava, että tämä asia on oivallettu monella taholla. Vastikään on perustettu betoniteollisuuden laaduntarkastusyhdistys, monet ovat kiinnostuneita sarjavalmistettujen elementtien tyyppihyväksynnän alullepanemisesta ja jännitettyjen betonirakenteiden normit [3] mahdollistavat näiden rakenteiden kokeellisen mitoittamisen. Silloin kun edellä mainitut järjestelyt on saatu hallitusti toimimaan, onkin ilmeisesti tämän hetken ylimenokausi ohi.

Nopeasti kehittynyt tietokonetekniikka on monin tavoin lisännyt teräsbetonirakenteiden suunnittelijoiden mahdollisuuksia. On kuitenkin pidettävä mielessä, ettei tietokonelaskenta käyttäessään perinteisiä kimmoteorian mukaisia olettamuksia sinänsä mitenkään paranna teräsbetonirakenteiden kelpoisuutta. Tietokonetekniikan avulla on kuitenkin mitä parhaat mahdollisuudet vaikuttaa edullisesti teräsbetonirakenteiden kelpoisuuteen kehittämällä menetelmiä, joiden avul-

tämenettelyksi.

Teräsbetonirakenteiden valmistuksen nykytilanteen analysoinnissa tulisi tarkastella erikseen:

- perinteistä paikallavalutekniikkaa
- suurmuottitekniikkaa
- betonielementtitekniikkaa
- erikoismenetelmiä.

Edelleen tulisi analysoida ainakin seuraavat valmistustekniset asiat:

- aineosien, betonin ja rakenteen laadunvalvontatoimenpiteet
- raudoitustyön suoritus ja raudoituksen asennus
- betonimassan valmistus ja kuljetus
- betonointi
- lämpökäsittely
- jälkihoito

Olisi selvitettävä, voidaanko betonin puristuslujuuspotentialiaa li määrittää käyttämällä jotain pikakoetusmenetelmää.

Olisi harkittava rakenteista poraamalla irroitettujen koekappaleiden valitsemista rakenteiden kelpoisuutta osoittaviksi normikoe-kappaleiksi. Tämä edellyttäisi mm. että porakalustosta tulisi jokaisen teräsbetonirakentajan tavanomainen työkone.

Olisi selvitettävä, mikä yhteys on rakenteiden lyhytaikaisen koekuormituksen antaman tuloksen ja rakenteelta vaaditun kelpoisuuden välillä. Esimerkiksi, kun on kyseessä rakenne, jonka kelpoisuus edellyttää pitkäaikaista kestävyyttä vaikeissa ympäristöolosuhteissa, lyhytaikaisen koekuormituksen antama tieto varmasti ole erityisen

mukaistaisi teräsbetonirakenteiden suunnittelua ja valmistusta ja lisääisi näiden ominaisuuksiltaan vaikeasti hallittavien rakenteiden kelpoisuuden tuntemusta. Kuitenkin teräsbetonirakenteiden toiminnallisen analyysin edellytyksenä on, että tutkimuksin selvitetään mahdollisimman paljon kohdassa 5.2.2 esitetyistä seikoista.

Kirjallisuutta

- [1] Rechartt, T., Betoninormien työmaalle asettamat tehtävät. Rakennusvalvonta (1966) 4, s. 21...24.
- [2] Betonielementtinormit 1967. Helsinki 1968. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 56.
- [3] Jännitettyjen betonirakenteiden normit 1970. Helsinki 1970. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 82.
- [4] Rechartt, T. & Poijärvi, H., Correlation between standard test results and concrete strength in structures. Nordisk betong 13 (1969) 3, s. 171...182.

Heikki Poijärvi, apul.prof., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi.

aivan suora, ei kyseessä ole vakavuusprobleema vaan puristus-taivutusprobleema. Ajatellaan kuitenkin näiden "virheiden" olevan niin pieniä, että ne voidaan jättää huomioonottamatta sen jälkeen, kun sauva on alkanut taipua. Näin ollen päädytään seuraavaan problemaan: On määritettävä puristussauvan edullisin kapenemismuoto, kun sauva on nurjahdusta seuranneessa taipuneessa tilassa.

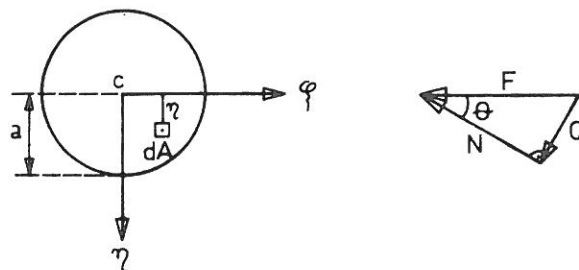
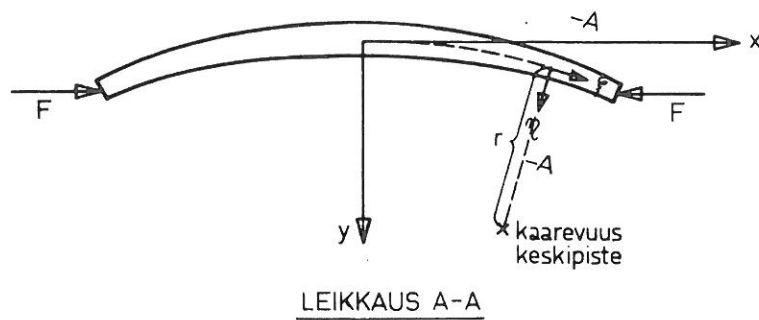
Koska taipumisesta aiheutuva leikkausjännitys on vähäinen verrattuna puristusjännitykseen, jätetään se huomioonottamatta myötöhdossa. Paksuuden jakautuma on ilmeisesti edullisin silloin, kun puristuksesta ja taivutuksesta johtuvan normaalijännityksen itseisarvon maksimi on vakio pitkin sauvan pituutta.

OTAKSUMAT

Probleemaa tarkasteltaessa tehdään seuraavat otaksumat:

1. Teknisen taivutusopin perushypoteesi (Bernoulli - Navier) ([5] s. 191) on voimassa.
2. Timoshenkon hypoteesi, jonka mukaan sauvan taipumaviivan kaltevuus on taivutusmomentin ja leikkausvoiman vaikutusten summa ([4] tai [5] s. 289) on voimassa.
3. Sauvan poikkileikkauksen muoto on joka kohdassa sama mutta pinta-ala muuttuu.
4. Sauvan päissä on ideaaliset nivelet.
5. Konstitutiiviset yhtälöt ovat jatkuvia ja yksikäsitteisiä.

Näiden olettamusten pohjalta tutkitaan, miten sauvan poikkileikkauk-



Kuva 1.

Kuvasta 1 nähdään vielä seuraavat yhteydet

$$N = F \cos \theta \tag{6}$$

$$Q = F \sin \theta$$

$$M = - F [y(\ell) - y] \tag{7}$$

$$\sin \theta = \frac{dy}{d\xi} \tag{8}$$

Otaksuman 2. mukaan kokonaiskallistuma on

$$\theta = \psi + \beta \tag{9}$$

Tässä ψ on taivutusmomentin osuus ja leikkausvoiman osuus β saadaan ([5] 86§) kaavasta

$$\beta = \frac{\zeta Q}{E_{\sigma} A} \tag{10}$$

jossa ζ on poikkipinnan siirtymäkerroin, esim. ympyräpoikkipinnalla

Ympyrän muotoiselle poikkipinnalle saadaan

$$k_{2j} = \pi^j (j + 1) (2^j j!)^2 / (2j)! \quad (17)$$

$$k_{2j+1} = \infty$$

Yhtälöistä (12) saadaan ottamalla huomioon merkinnät (13) ja (14) sekä α :n lauseke (5)

$$N = A \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma^{(n)}(\epsilon_0)}{n! k_n} (\epsilon_{sall} - \epsilon_0)^n \left(\frac{\sqrt{A}}{a}\right)^n \quad (18)$$

$$-M = A^{3/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma^{(n)}(\epsilon_0)}{n! k_{n+1}} (\epsilon_{sall} - \epsilon_0)^n \left(\frac{\sqrt{A}}{a}\right)^n$$

Yhdenmuotoisuusolettamuksesta 3. seuraa edelleen, että

$$\sqrt{A}/a = h \quad (19)$$

on vakio. Ympyräpoikkipinnalla sen arvo on $\sqrt{\pi}$.

YHTÄLÖIDEN MUUTTAMINEN DIMENSIOTTOMIKSI

Valitaan vertailupinta-ala A_0 seuraavasti

$$A_0 = \frac{F}{\sigma_{sall}} \quad (20)$$

Määritellään dimensiottomat suureet

$$s = \xi/l, \quad v = y/l, \quad u = A/A_0, \quad m = M/lF \quad (21)$$

Yhtälöistä (18) ja (19) saadaan käyttäen hyväksi kaavoja (6), (8), (10), (11), (15), (19), (20) ja (21)

$$\frac{\cos \theta}{u} = \frac{\sigma(\epsilon_0)}{\sigma_{sall}} + \frac{1}{\sigma_{sall}} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sigma^{(n)}(\epsilon_0) h^n}{n! k_n} (\epsilon_{sall} - \epsilon_0)^n$$

Kaavojen (27) ja (28) avulla saadaan rekursiivisesti määrätetyksi kaikki derivaatat $\sigma^{(n)} = d^n \sigma / d\varepsilon^n$ pisteessä $(\varepsilon_0, \sigma_0)$. Kaavassa (28) oleva summalauseke voidaan vielä termejä ryhmittelemällä saattaa toiseen muotoon

$$\sum_{k=1}^n \binom{n}{k} \sigma^{(k)} \sigma^{(n-k+1)} = \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \binom{n+1}{k} \sigma^{(k)} \sigma^{(n-k+1)} + \left(\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor - \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \right) \binom{n}{\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor} \left(\sigma^{\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor} \right)^2 \quad (29)$$

Näissä $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ on binomikerroin ja $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ on suurin kokonaisluku $\leq \frac{n}{2}$. Lähteen [5] II osan sivulla 750 kaavat (g):stä (k):hon annetaan, kun $g(\sigma) = G_\sigma / E$

$$g(\sigma) = \frac{E_{\text{sec}}/E}{2(1+\nu)}$$

$$\nu = \nu_p - (\nu_p - \nu_e) E_{\text{sec}}/E \quad (30)$$

$$\frac{E_{\text{sec}}}{E} = \frac{\sigma/\sigma_{ty}}{c \frac{\sigma}{\sigma_{ty}} - (1-c) \ln(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{ty}})}$$

Kaavoissa $E = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\sigma=0}$ on Hooken lain mukainen kimmokerroin. Parametrien c arvot annetaan lähteen [5] taulukossa 4 sivulla 82. Useilla isotrooppisilla aineilla $\nu_p = 0,5$ ja $\nu_e = 0,3$.

REUNAHDOT

Sauvan keskellä, jossa $s = 0$, saadaan (ks. kuva 1) reunaehdot

$$\psi = \sqrt{\frac{\pi l^2 \sigma_{sall}}{F}} \int_0^s \frac{\epsilon_{sall} - \epsilon_0}{(1 - \epsilon_0) \sqrt{u}} ds \quad (36)$$

Tarvittavat konstitutiiviset yhtälöt sisältyvät kaavoihin (26)···(30). Kaavat (34) ja (36) antavat aiheen valita seuraavat konstruktioparametrit

$$a = \sqrt{\frac{\pi l^2 \sigma_{sall}}{F}} \quad (\text{kuormitusparametri})$$

$$n = \sigma_{ty} / \sigma_{sall} \quad (\text{varmuusluku}) \quad (37)$$

On syytä huomata, että parametri a ei ole sama kuin professori Laasonen käyttämä ([5] s. 742 kaavat (0)).

Tekniikan ylioppilas Tapio Nora on sovelletun matematiikan erikoistytönä TKK:ssa kehittänyt yhtälöiden ratkaisemiseen sopivan laskualgoritmin ja laatinut sen perusteella tietokoneohjelman. Kaikki numeeriset tulokset perustuvat tähän erikoistytöhön. Olen hänelle kiitollinen saamastani avusta.

Korkein sarjoissa mukaan otettu derivaatta on ollut $\sigma^{(4)}(\epsilon_0)$. Tuloksissa on yleensä tyydytty kahteen desimaaliin. Koska kaikkien tuloksiin vaikuttavien suureiden (konstruktioparametrien a ja n lisäksi on vielä materiaaliparametrit E , σ_{ty} ja c) vapaan muuntelun salliminen johtaisi hyvin suureen määrään taulukoita, on tehtävää pyritty rajoittamaan. Tästä syystä on varmuusluvuksi tyssäykseen nähdän valittu $n = 1,1$.

Materiaaleiksi on valittu:

- suomalainen mänty ja kuusi (taulukot I ja II)
- elektronimetalli ja duralumiini (taulukot III ja IV)

Taulukko I. Mänty. $E = 110\,000 \text{ kpcm}^{-2}$, $\sigma_{ty} = 450 \text{ kpcm}^{-2}$, $c = 0,770$

s \ a	1000	500	200	100	50	30	20
0,0	45,73	22,95	9,22	4,63	2,36	1,50	1,14
0,1	44,58	22,37	9,00	4,53	2,32	1,48	1,13
0,2	41,04	20,64	8,32	4,21	2,19	1,43	1,12
0,3	34,65	17,48	7,10	3,65	1,95	1,33	1,09
0,4	24,19	12,30	5,11	2,73	1,59	1,20	1,05
0,45	16,21	8,36	3,61	2,05	1,34	1,11	1,03
0,475	10,69	5,63	2,59	1,61	1,19	1,06	1,01
0,5	0,91	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00

Taulukko II. Kuusi. $E = 129\,000 \text{ kpcm}^{-2}$, $\sigma_{ty} = 470 \text{ kpcm}^{-2}$, $c = 0,930$

s \ a	1000	500	200	100	50	30
0,0	42,29	21,15	8,42	4,18	2,07	1,26
0,1	41,24	20,63	8,22	4,09	2,03	1,25
0,2	37,98	19,02	7,61	3,80	1,92	1,22
0,3	32,09	16,12	6,50	3,30	1,73	1,17
0,4	22,44	11,36	4,69	2,48	1,44	1,09
0,45	15,06	7,73	3,32	1,89	1,24	1,05
0,475	9,96	5,23	2,40	1,51	1,13	1,03
0,5	0,95	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00

Taulukko III. Elektronimetalli. $E = 460\,000 \text{ kpcm}^{-2}$, $\sigma_{ty} = 1000 \text{ kpcm}^{-2}$
 $c = 0,857$

s \ a	1000	500	200	100	50	30
0,0	33,01	16,51	6,59	3,29	1,68	1,13
0,1	32,20	16,10	6,44	3,22	1,66	1,12
0,2	29,66	14,86	5,97	3,01	1,58	1,11
0,3	25,10	12,61	5,12	2,64	1,46	1,08
0,4	17,60	8,93	3,74	2,04	1,27	1,04
0,45	11,86	6,13	2,70	1,61	1,15	1,02

Taulukko VII. St 52. $E = 2\,150\,000 \text{ kpcm}^{-2}$, $\sigma_{ty} = 3850 \text{ kpcm}^{-2}$,
 $c = 0,965$

s \ a	1000	500	200	100	50
0,0	29,92	14,92	5,90	2,90	1,42
0,1	29,19	14,55	5,77	2,84	1,40
0,2	26,70	13,43	5,35	2,66	1,35
0,3	22,76	11,41	4,59	2,34	1,27
0,4	15,98	8,09	3,37	1,84	1,15
0,45	10,80	5,57	2,46	1,48	1,08
0,475	7,21	3,84	1,86	1,27	1,04
0,5	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00

Taulukko VIII. Taipuman maksimiarvo ($v = y/l$)

a	1000	500	200	100	50	30	20
mänty	0,0951	0,0661	0,0393	0,0247	0,0132	0,0064	0,0022
kuusi	0,0733	0,0506	0,0295	0,0178	0,0084	0,0027	
elektroni	0,0540	0,0370	0,0211	0,0123	0,0052	0,0013	
duralum.	0,0959	0,0667	0,0395	0,0246	0,0129	0,0056	0,0011
St 37	0,0294	0,0198	0,0106	0,0052	0,0009		
St 48	0,0355	0,0240	0,0131	0,0068	0,0015		
St 52	0,0414	0,0282	0,0156	0,0085	0,0026		

ESIMERKKI

On mitoitettava teräksestä St 37 valmistettava 1 m pitkä poik-
kileikkaukseltaan ympyrän muotoinen puristustuki, joka kestää voiman
2500 kp. Varmuus tyssäykseen nähden on 1,1. Tällöin

$$F = 2500 \text{ kp}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$\sigma_{ty} = 2400 \text{ kpcm}^{-2}$$

$$\sigma_{\text{mitoit}} = 2181,82 \text{ kpcm}^{-2}$$

Tässä esitetty teoria. n = 1,1 ja c = 0,949				Laasosen teoria. n = 1 ja c = 0,9			
s	u	A = uA ₀ cm ²	$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ cm	u	A cm ²	d cm	1,1A cm ²
0,0	3,84	4,40	2,37	4,15	4,32	2,35	4,75
0,1	3,76	4,31	2,34	4,05	4,22	2,32	4,64
0,2	3,50	4,01	2,26	3,73	3,88	2,22	4,27
0,3	3,04	3,49	2,11	3,15	3,29	2,05	3,62
0,4	2,32	2,66	1,84	2,24	2,33	1,72	2,56
0,45	1,79	2,05	1,62	1,59	1,65	1,45	1,82
0,475	1,45	1,66	1,45				
0,5	1,00	1,15	1,21	1,00	1,04	1,15	1,14

Taulukko 1. Poikki-pinta-alan ja halkaisijan jakautuma esimerkkita-pauksessa tässä esitetyn teorian ja professori Laasosen teorian perusteella määritettynä.

Kirjallisuutta

- [1] Ylinen, A., Erweiterung der Bernoullischen Biegungstheorie auf den unelastischen Bereich. Suomalaisen tiedeakateman toimituksia, Sarja A, Nid. LVII. No. 7. Helsinki 1941.
- [2] Ylinen, A., Über die Knickbiegefestigkeit eines exzentrisch belasteten ursprünglich gekrümmten Stabes. Suomalaisen tiedeakateman toimituksia. Sarja A, Nid. LVII. No. 14. Helsinki 1941.
- [3] Ylinen, A., Eräs aksiaalisen jännitystilän muodonmuutosfunktio ja sitä vastaava nurjahduskaava. Tekn. Aikakauslehti 38 (1948).
- [4] Ylinen, A., The effect of shearing force on the buckling load beyond the limit of proportionality. Acta Techn. Hung. 50 (1965) pp. 403...414.
- [5] Ylinen, A., Kimmo- ja lujuusoppi, osat I ja II (2. painos, 1965 ja 1969). WSOY. Helsinki.

selvästi mittauksilla osoitettavissa. Vastaavanlaisia repeämiä on muutenkin merten pohjissa.

Mannerliikuntojen teorian kannalta tällaiset repeämät ovat sitä tukevia fysikaalisia tosiasioita. Muun muassa Wegener on kuuluisa mannerliikuntateoriastaan, mutta geologina hän ei voinut millään laskelmalla osoittaa, että teoria pitäisi paikkansa. Ideoiden pätevyys on tietenkin osoitettava laskelmin käyttämällä sopivaa matemaattista mallia. Tämä vaatii ainakin kimmo- ja plastisuusteorian, hydrodynamiikan, lämmönjohtumisteorian jne. hyvää asiantuntemusta. Ensimmäisenä todella korkealuokkaisena maapallossa tapahtuvien liikuntojen tutkimuksena voitaneen mainita Pekeriksen (1935) julkaisu, joka perustuu konvektioteoriaan ja hydrodynamiikkaan. Merkillistä kyllä, hänen arvokas tutkimuksensa on saanut hyvin vähän huomiota osakseen. Konvektioteorialla maapallon yhteydessä tarkoitetaan seuraavaa. Syystä tai toisesta jollakin alueella on radioaktiivista ainetta normaalia huomattavasti enemmän, jolloin kyseinen alue (tavallisesti maankuoren alainen kerros) lämpiää ympäristöään korkeampaan lämpötilaan, aineen tiheys pienenee, potentiaalienttä häiriytyy, ja näin virtaus pääsee alkuun. Tämä aiheuttaa puolestaan jännityksiä, jotka ovat paitsi virtauksesta myös lämpötilagradienitista peräisin.

Fennoskandian maannousun perusteella Niskanen (1948) on laskenut maapallolle keskimääräisen viskositeetin, joka on samaa luokkaa ($1.5 - 4.6 \cdot 10^{22}$ g/cms) kuin arvo, johon on päästy kokonaan muita teitä. Alkudeformaationa Niskanen käytti aikaisemmassa julkaisussaan (1943) laskemaansa Fennoskandian aikoinaan peittäneen jäävuoren syn-

loin kuormitus voidaan lausua Legendren polynomien avulla seuraavasti

$$f(\theta) = \frac{q_1}{\cos\theta_0} \sum_{n=1}^{\infty} (P_{2n+1}(\cos\theta_0) - P_{2n-1}(\cos\theta_0)) P_{2n}(\cos\theta) \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{1 - \cos\theta_0}{\cos\theta_0} q_1 \quad (2)$$

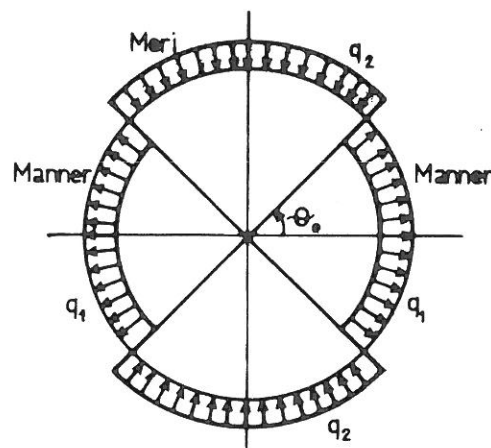
$f(\theta)$ = kuormitusfunktio

P_i = Legendren i :nnten kertaluvun polynomi

q_1 = kuormitus mantereella

q_2 = kuormitus merellä

θ_0 = rajakulma



Kuva 1.

Mallissa otaksutaan lisäksi maapallon sisuksen käyttäytyvän erittäin viskoosin nesteen tavoin. Koska viskositeetti ja tiheys muuttuvat, vieläpä todennäköisesti epäjatkovasti, maapallon säteen funktiona, on palloa käsiteltävä monesta kerroksesta koostuneena. Kussakin kerroksessa viskositeetti ja tiheys pysyvät vakioina.

differentiaaliyhtälö

$$r^4 \phi_n'''' + 8r^3 \phi_n'''' + 2r^2(6 - n(n+1))\phi_n'' - 4rn(n+1)\phi_n' + n(n+1)(n(n+1) - 2)\phi_n = 0 \quad (9)$$

Tämän ratkaisu saadaan suljetussa muodossa

$$\phi_n(r) = A_n r^{-n-2} + B_n r^{-n} + C_n r^{n-1} + D_n r^{n+1} \quad (10)$$

jossa A_n, B_n, C_n, D_n ovat integroimisvakioita. Jos vakiot saadaan määritetyiksi, tunnetaan ϕ_n ja ψ_n ja siten myös u ja v . Vakiot määrätään reunaehdoista, joita varten on ensin laskettava jännitykset $u:n$ ja $v:n$ avulla

$$\sigma_r = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} \quad (11)$$

$$\sigma_\theta = -p + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right) \quad (12)$$

$$\tau_{r\theta} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \quad (13)$$

Näihin kaavoihin on sijoitettava u ja v lausuttuna tunnettujen ϕ_n :ien ja ψ_n :ien avulla.

Reunaehtoina käytetään

Maankuoren pinnalla $\sigma_r = f(\theta)$ ja $\tau_{r\theta} = 0$

Kerroksien i ja $i+1$ välisessä rajapinnassa pätee

$$\sigma_{r,i} = \sigma_{r,i+1}, \quad \tau_{r\theta,i} = \tau_{r\theta,i+1}, \quad u_i = u_{i+1}, \quad v_i = v_{i+1}$$

Alimmassa kerroksessa lisäksi $u = v = 0$ kun $r = 0$.

Näin saaduista reunaehtoyhtälöistä määrätään kullakin $n:n$ arvolla integroimisvakiot A, B, C, D jokaiselle kerrokselle. Tämän jälkeen ovatkin nopeudet ja jännitykset täysin tunnetut.

Tehtävää varten laadittava tietokoneohjelma on vielä kehitte-